Caracterización de la distribución espacial y temporal de las precipitaciones de la cuenca del río de La Plata

• Virginia Venturini* • Carlos Krepper •
Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina
*Autor para correspondencia

DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-05

Resumen

Venturini, V., & Krepper, C. (noviembre-diciembre, 2017). Caracterización de la distribución espacial y temporal de las precipitaciones de la cuenca del río de La Plata. *Tecnología y Ciencias del Agua*, *8*(6), 63-75, DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-05.

La cuenca del río de La Plata (LPB) ha experimentado cambios en las lluvias y los caudales de los ríos a partir de 1960. Sin embargo, el análisis del comportamiento de baja frecuencia de la serie de precipitaciones estandarizadas promediada para toda la cuenca presenta cambios peculiares, poniendo en evidencia tres periodos diferentes: un primer periodo comprendido entre 1901 y 1959, con una pequeña tendencia lineal positiva; un segundo periodo con una marcada tendencia positiva entre 1960 y 1983, y el último periodo posterior a enero de 1984 con tendencia negativa. Estos resultados se verifican con las series temporales de caudal en diferentes ríos de LPB. Dada la gran dimensión de LPB se estudiaron las variaciones espaciales de las tendencias de las precipitaciones estandarizadas. Este análisis se realizó para los tres periodos antes definidos. Dado que estas variaciones temporales sin duda debieron afectar la recurrencia de eventos extremos, se utilizaron los índices denominados *Standardized Precipitation Index* (SPI) anuales para estudiar esos eventos. Así, se investigó la distribución espacial de las componentes principales de las series de SPI [12]. Los resultados marcan diferentes regiones climáticas con características distintas que difieren de las subcuencas hidrológicas delineadas de forma tradicional. Tales regiones están influenciadas por diferentes fenómenos, aunque el efecto del ENSO está presente en la mayor parte de la cuenca.

Palabras clave: cuenca del Plata, SPI, precipitaciones, señales climáticas.

Abstract

Venturini, V., & Krepper, C. (November-December, 2017). Characterization of the spatial and temporal distribution of precipitation in the La Plata River Basin. Water Technology and Sciences *(in Spanish), 8(6), 63-75, DOI: 10.24850/j-tyca-2017-06-05.*

The La Plata River Basin (LPB) has been undergoing changes in rainfall and river flows ever since 1960. Furthermore, unusual changes have been found from analyzing the low-frequency behavior of an averaged, standardized rainfall series throughout the basin. Three different periods were identified: the first between 1901 and 1959, with a slight positive linear trend; the second between 1960 and 1983 with a notable positive trend; and the last period, after January 1984, with a negative trend. These results have been verified in different rivers in the LPB by temporal flow series. Since the LPB is large, the spatial variations in the standardized rainfall trends were analyzed. This analysis was performed for the three periods mentioned above. Given that these temporal variations undoubtedly affect the recurrence of extreme events, the annual Standardized Precipitation Index (SPI) was used to study those events. Therefore, the spatial distribution of the main components in the SPI [12] series were analyzed. The results show various regions having characteristics that are different than hydrological sub-basins that are delineated by traditional means. While these regions are affected by different phenomena, the ENSO effect is present throughout most of the basin.

***Keywords**: La Plata Basin, SPI, precipitation, climatic signals.*

Recibido: 10/10/2015
Aceptado: 09/06/2017

Introducción

La cuenca del río de La Plata (LPB) es una de las más grandes del mundo. Se extiende sobre un área de unos 3 100 000 km^2, compartida por cinco países (Argentina, Bolivia, Brasil, Paraguay y Uruguay), como se observa en la figura 1. El total de la población de la cuenca es superior a los 100 millones de habitantes, concentrados principalmente en ciudades; sólo un 13% de la población vive en áreas rurales (UNESCO-WWAP, 2007). La importancia económica y social de la LPB es enorme, dado que es una fuente importante de energía y alimento para los países involucrados. Se estima que 70% del producto bruto nacional de los cinco países juntos se produce en esta cuenca (UNESCO-WWAP, 2007). Hidrográficamente hablando, la cuenca contiene cuatro subcuencas muy bien diferenciadas: la cuenca del río Paraná, la del río Uruguay, la del río Paraguay y la del río de La Plata propiamente dicho. El río Paraná y el Uruguay confluyen en el río de La Plata. El río Paraguay desemboca en el río Paraná pocos kilómetros aguas arribas de la ciudad de Corrientes. Numerosos estudios se han realizado en relación con las variaciones climáticas y ambientales en Sudamérica, y en particular sobre la LPB. Diferentes autores han utilizado los caudales de los principales ríos de Sudamérica como indicadores de la variabilidad climática desde la escala interanual a la secular (entre otros, Marengo, 1995; García & Vargas, 1998; Robertson & Mechoso, 1998). El uso de los caudales como un adecuado sustituto de otras variables como la precipitación, en el estudio de la variabilidad climática, implica la suposición de que los cambios experimentados por los caudales reproducen y amplifican la variabilidad de las precipitaciones. Este supuesto muy probablemente no sea del todo cierto en cuencas de gran magnitud, sobre todo en aquellas que involucran diferentes unidades climáticas, como las cuencas de los ríos Paraná y Paraguay. Krepper, García y Jones (2006, 2007) han demostrado que sobre dichas cuencas no todas las señales presentes en la precipitación son reflejadas en los caudales y viceversa.

La circulación atmosférica sobre la LPB tiene una notable estacionalidad, que se observa en las señales estadísticamente significativas del ciclo anual de las componentes del balance hídrico (Caffera & Berbery, 2006; Venturini & Krepper, 2013). Distintos autores (entre otros, Krepper & Sequeira, 1998; Minetti & Vargas, 1998; Grimm, Barros, & Doyle, 2000; Barros & Silvestri, 2002; Liebmann *et al*., 2004; Caffera & Berbery 2006; Krepper *et al*., 2007; Barros, Doyle, & Camilloni, 2008; Krepper & Venturini, 2009) han analizado la respuesta interanual de las precipitaciones regionales respecto a eventos de El Niño/La Niña o directamente su relación con las temperaturas superficiales del mar (SST) en los océanos Pacífico Sur y Atlántico Sur. Estos autores concluyen que el ENSO es el principal responsable de la variabilidad interanual estival. Por otra parte, se han estudiado las tendencias de las precipitaciones en toda Sudamérica, considerando diferentes escalas temporales y regionales. Los resultados son variados, pero en general todos los autores coinciden que Sudamérica es una de las regiones del mundo que ha mostrado las mayores tendencias positivas en las precipitaciones estivales durante el siglo XX.

Caffera y Berbery (2006), con base en el régimen general de las precipitaciones, identificaron siete regiones climáticas bien diferenciadas: 1) la región de régimen monzónico en el Pantanal y la cuenca alta del río Paraná; 2) región del Gran Chaco; 3) el este de Paraguay; 4) El Planalto; 5) el litoral argentino; 6) el este de Uruguay y sur de Rio Grande do Sul, y 7) el sector suroeste del borde de la LPB. Estos sectores se caracterizan por estar influenciados por diferentes fenómenos, como El Niño/La Niña y la oscilación decadal del Pacífico (POD, por sus siglas en inglés).

Diferentes regiones de LPB son afectadas de forma recurrente por inundaciones y sequías, que dependiendo de su severidad y persistencia pueden provocar pérdidas cuantiosas. El uso de índices meteorológicos, con escalas temporales variables, como el Índice de Precipitación Estandarizado (SPI, por sus siglas en inglés), miden cuánto se apartan las precipitaciones de sus

• ISSN 0187-8336

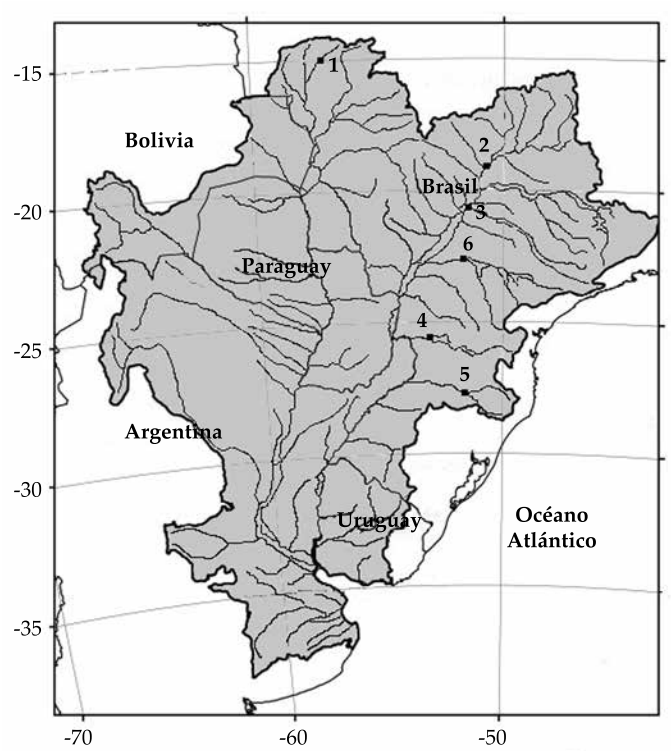

Figura 1. Límites de la cuenca del Plata y la ubicación de las estaciones hidrométricas utilizadas.

valores medios, en ciertos periodos de tiempo, para producir déficit y excesos.

En este trabajo se propone analizar y caracterizar las variaciones espacio-temporales de las precipitaciones y sus relaciones con las variaciones de los caudales producidos en la LPB desde enero de 1901 hasta diciembre de 2011. Se analizan los cambios de baja frecuencia en el SPI [12] para lograr zonificar sus variabilidad espacio-temporal.

Datos y metodología

La base de datos CRU TS3.2 (www.cru.uea.ac.uk/) es la fuente de datos de precipitaciones mensuales utilizada en el trabajo, con una resolución de 0.5 x 0.5° para el periodo comprendido entre enero de 1901 y diciembre de 2011, que conforman una grilla de 2 045 puntos sobre la totalidad de LPB. También se analizaron seis estaciones de aforo ubicadas sobre los ríos Paraná, Paraguay y Uruguay, con 70 años de registros naturalizados de caudales mensuales (1931-2000), como se observa en la figura 1. Las series de datos de caudales de las estaciones localizadas en territorio brasileño se obtuvieron del Operador Nacional do Sistema Eléctrico (ONS) do Brasil (www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx) y los datos de estaciones argentinas corresponden a la Subsecretaría de Recursos Hídricos (SHR) de Argentina. En el cuadro 1 se presenta el nombre de la estación de aforo, las coordenadas de la misma, la cuenca a la que pertenece y el río sobre la que está ubicada.

El conocido y ampliamente difundido índice meteorológico denominado SPI fue propuesto originalmente por McKee, Doesken y Kleist (1993, 1995), para cuantificar el déficit de precipitación en diferentes escales temporales, por ejemplo 3, 6, 9 y 12 meses, y su primera aplicación consistió en el monitoreo de las sequías

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 1. Estaciones de aforo en la cuenca del Plata.

Estación	Latitud, longitud	Cuenca	Río
1. Manso	14.50 S, 55.56 W	Paraguay	Manso
2. Sao Simao	18.59 S, 50.32 W	Paraná	Paranaíba
3. IlhaSolteira	20.58 S, 51.36 W	Paraná	Paraná
4. Salto Osorio	25.32 S, 53.00 W	Paraná	Iguazú
5. Ita	27.16 S, 52.19 W	Uruguay	Uruguay
6. Rosana	22.36 S, 52.35 W	Paraná	Paranapanema

en el estado de Colorado, EUA. El SPI es simplemente la transformación de la serie temporal de precipitaciones en una serie de distribución normal. Una descripción detallada para calcular el SPI se puede encontrar en Lloyd-Huges y Saunders (2002). En este trabajo se transformaron las series mensuales de precipitaciones para cada nodo de la grilla en series de SPI [12], es decir para 12 meses.

De acuerdo con McKee *et al*. (1995), y Hayes, Svoboda, Wilhite y Vanyarkho (1999), la intensidad de las sequías y los excesos pueden identificarse según diferentes categorías con sus correspondientes probabilidades de ocurrencia, como se muestra en el cuadro 2.

El análisis por Componentes Principales (PCA) es un método cuyo principal objetivo es reducir la dimensión de las observaciones. Detalles sobre este método se encuentran, entre otros, en Jackson (1991), y Von Storch y Zwiers (1999). Básicamente el método redistribuye la variabilidad de un grupo grande de variables en un grupo más pequeño de nuevos componentes, denominados modos empíricos ortogonales en espacio y tiempo. La condición de ortogonalidad de los modos produce soluciones dependientes de la forma del dominio de los datos (Horel, 1981). Una rotación de los autovectores puede ayudar a superar la dependencia de la forma del dominio. La rotación de tipo Varimax (Kaiser, 1958) encuentra modos mejor distribuidos en el espacio que las componentes normales sin rotar.

El análisis espectral singular (SSA, por sus siglas en inglés) es un método estadístico relacionado con el PCA, aplicado en el dominio temporal, que permite estudiar la estructura de las series de tiempo. Una descripción detallada del método se tiene en Golyandina,

Cuadro 2. Componentes principales normales (PC) y rotadas (RPC) obtenidas para toda LPB, utilizando el índice SPI [12].

PC núm.	SPI [12]	
	Contribución a la varianza (%)	
	Original PC(s)	Rotada RPC(s)
1	27.2	13.6
2	16.0	6.4
3	10.4	3.8
4	7.0	11.3
5	5.0	6.2
6	3.4	8.7
7	3.0	10.1
8	2.7	6.5
9	2.2	6.3
10	2.1	5.8

• ISSN 0187-8336

Nekrutkin y Zhigljavsky (2001). Básicamente el SSA descompone la serie de interés en distintas componentes aditivas, que típicamente pueden ser interpretadas como "tendencias", que corresponden a las partes de las series con variaciones suaves y lentas (un significado más amplio que el de las simples tendencias lineales), y varias componentes oscilatorias (quizás con modulación en sus amplitudes), además de las componentes que denominaremos "ruido".

Tendencias lineales sobre LPB

Como se mencionó en la introducción, la LPB ha experimentado un cambio pronunciado en las precipitaciones y caudales de sus ríos desde 1960 (Antico, Schlotthauer, & Torres, 2014; Bayer & Collischonn, 2013). En general, dichos cambios están asociados con las tendencias regionales de las precipitaciones; sin embargo, un análisis del comportamiento en baja frecuencia de la serie promedio de las precipitaciones estandarizadas para toda la cuenca, *Premedia(t)*, presenta un comportamiento peculiar luego de 1960. La figura 2 muestra la *Premedia(t),* previamente filtrada mediante un filtro Lanczos pasa-bajos (Duchon, 1979), con una frecuencia de corte $f_0 = 0.05$/mes ($T_0 = 20$ meses) y 36 pesos. El filtro elimina la variabilidad interanual y las fluctuaciones cuasi anuales. En la figura 2 se pueden apreciar tres diferentes periodos: un periodo entre enero de 1901 y diciembre 1959, con una tendencia lineal positiva (pendiente $b = 0.2\ 10^{-3}$/mes); un segundo periodo con una tendencia positiva pronunciada ($b = 0.7\ 10^{-3}$/mes) entre enero de 1960 y diciembre de 1983; por último, un tercer periodo entre enero de 1984 y diciembre de 2011, con una tendencia negativa ($b = -0.2\ 10^{-3}$/mes), que coincidentemente se observa luego del evento extremo de 1983 asociado con el ENSO de 1982-1983.

El comportamiento en baja frecuencia de la series de caudales de los diferentes ríos de la región coincide con los resultados observados en la figura 2. El filtro de Lanczos se aplicó a los caudales estandarizados de las estaciones de aforo del cuadro 1. En efecto, en la figura 3 se pueden ver las tendencias lineales de cada uno de los tres periodos antes descritos. Los comportamientos de baja frecuencia de los caudales reflejan en cierta forma el comportamiento general de las precipitaciones (ver figura 2). Cabe aclarar

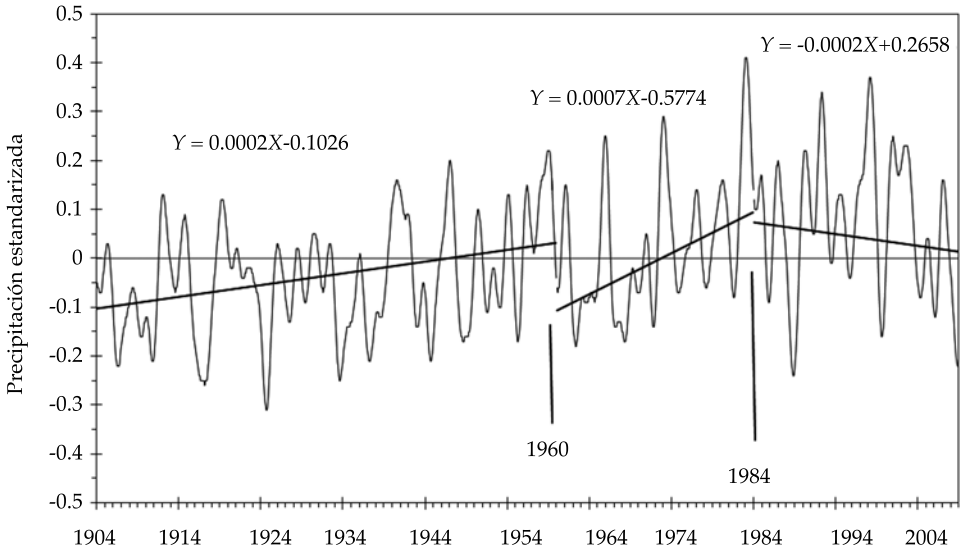

Figura 2. Serie promedio de precipitaciones estandarizadas para toda la cuenca y las tendencias para los tres periodos identificados.

ISSN 0187-8336 •

que a las variaciones de las precipitaciones se les superpone el efecto de la deforestación del bosque nativo, que ha afectado gran parte de la LPB. El cambio del uso del suelo en la LPB fue muy importante en Brasil a partir de la década de 1950, intensificándose en el decenio de 1960, fundamentalmente en los estados de Mato Grosso do Sul, Paraná y Sao Paulo, donde la producción intensiva de café fue drásticamente sustituida por cultivos anuales, como maíz y soja (Tucci & Clarke, 1998). En 1988 ya se evidenciaba que gran parte de la región estaba afectada por una intensa influencia antropogénica (Leite, Costa, Soare-Filho, & Hissa, 2012). En Paraguay se desarrollaba un proceso similar de cambio en el uso del suelo, cuya mayor intensidad se dio a partir de inicio de los años de 1980. Huang *et al*. (2007) revelaron que en 1973, en la región oriental del Paraguay, el área cubierta por el bosque nativo representaba un 73.4% de la superficie original, reduciéndose rápidamente a 40.7% para 1989, hasta alcanzar 24.9% en 1999. En Argentina, la superficie cubierta por bosque en el año 2000 era de alrededor de 50% de su superficie original, y ésta continuó siendo reemplazada principalmente por cultivos de tabaco, té y yerba mate, además de cultivos forestales, que ocupan grandes extensiones. El reemplazo del bosque por cultivos, durante el periodo 1960-1980, causó un aumento del escurrimiento superficial y por lo tanto potenció el incremento de los caudales.

En cuanto a las temperaturas, el Observatorio de la Tierra de la National Aeronautics and Space Administration (NASA, http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/decadaltemp.php) muestra resultados de los cambios en temperatura global en cada década desde 1900. La LPB no presentaba cambios positivos en las temperaturas hasta 1964. A partir de 1965 y hasta 1984, la tasa de aumento es de 0.10 a 0.15 °C por decenio. Es decir, que las temperaturas no ha registrado un aumento sostenido como en las precipitaciones durante 1960-1980, por lo que la evaporación no pudo haber aumentado lo suficiente como para restar más agua del sistema. A finales de siglo se acentuó el aumento de las temperaturas en la región (Báez, 2006) y, por ende, un ascenso de la evapotranspiración y evaporación. Este incremento de las pérdidas de agua puede ser la causa de las tendencias negativas que se observan después de 1984 en los ríos Manso, Ilha Solteira, Ita y Rosana.

Los resultados expuestos ameritan el análisis de la distribución espacial de las tendencias lineales, expresadas por las pendientes de las líneas, a lo largo de los tres periodos mencionados. Para cada punto de grilla se calculó la pendiente de la tendencia usando el método denominado TSA, desarrollado por Hirsch, Slack y Smith (1982):

$$b = \text{mediana}\left(\frac{\text{Precip}(j) - \text{Precip}(k)}{j-k}\right) \forall\, k < j \quad (1)$$

Además, se estimó el nivel de significancia de las pendientes mediante el conocido test estadístico de Mann-Kendall luego de un "preblanqueado de la serie", como fuera propuesto por Yue, Pilon, Phinney y Cavadis (2002), para eliminar la influencia de las autocorrelaciones en la determinación de tendencias de las series. La figura 4 muestra la distribución espacial de las pendientes de las tendencias estadísticamente significativas.

Durante el periodo 1901-1959, prácticamente toda la cuenca al norte de los 26° S presentaba tendencias negativas en las precipitaciones, mientras que al sur de los 30° S, las tendencias eran positivas. La situación cambió en el periodo 1960-1983, cuando la cuenca superior del río Paraná, las sierras de Gerais, cuenca del río Iguazú, la región del Pantanal y la cuenca superior del río Paraguay presentaban fuertes tendencias positivas. En dicho periodo, las máximas tendencias se registraron sobre la cuenca del río Iguazú, alcanzando valores superiores 1.7 x 10^{-3}/mes, en las precipitaciones estandarizadas. Al sur de los 30° S las tendencias continúan positivas. El periodo 1984-2011, contrariamente a los anteriores, se caracterizó por tendencias negativas en casi toda la cuenca.

Tecnología y Ciencias del Agua, vol. VIII, núm. 6, noviembre-diciembre de 2017, pp. 63-75

• ISSN 0187-8336

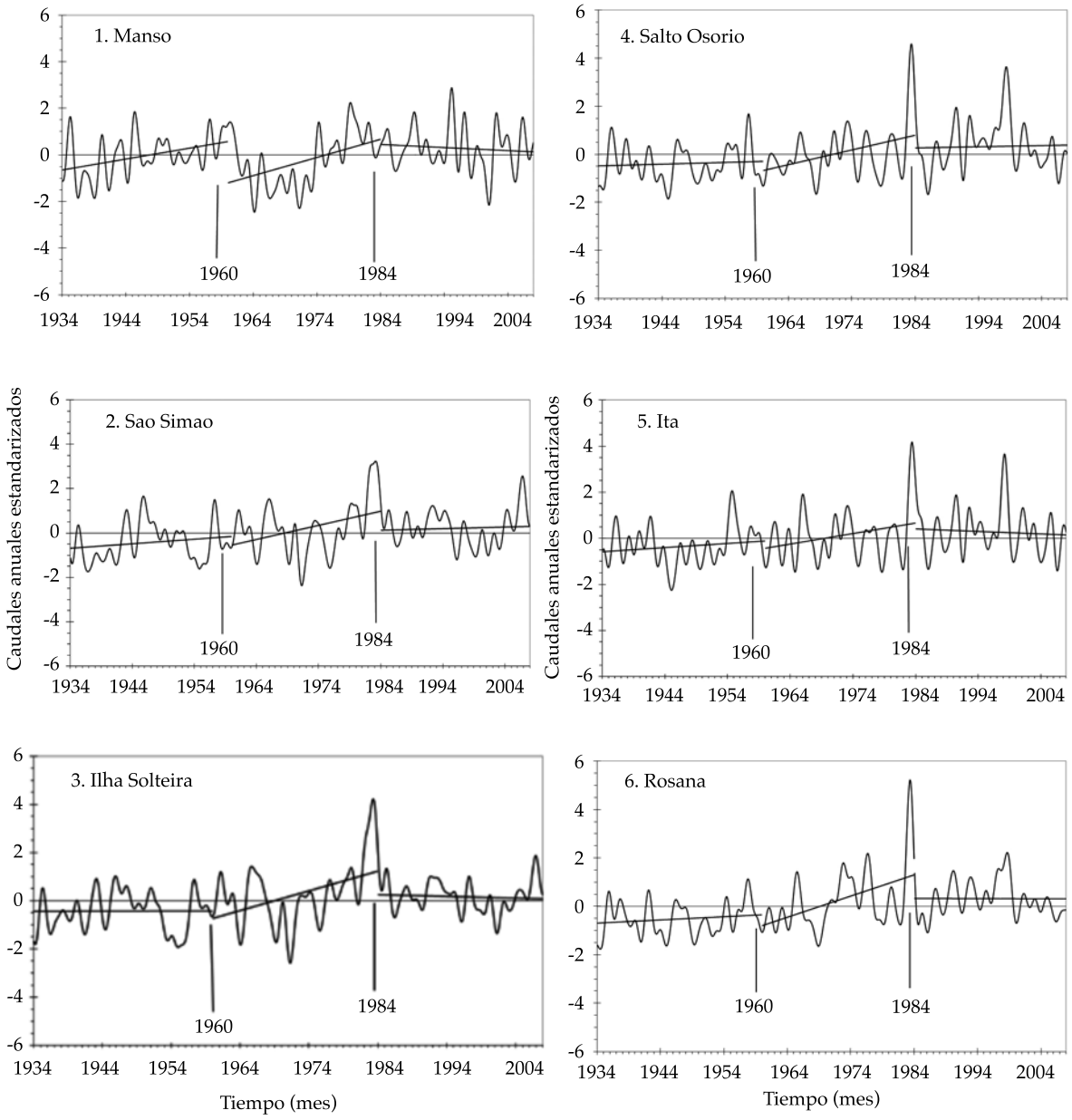

Figura 3. Tendencias de los caudales estandarizados de los ríos de LPB listados en el cuadro 1, diferenciados en tres periodos.

Se destaca que durante el periodo 1901-1959 la cuenca se divide en sentido norte-sur, es decir, que entre las latitudes 14° S y 24° S, las tendencias eran negativas, mientras que debajo de la latitud 26° S las tendencias eran positivas. Entre las latitudes 24° S y 26° S no se registraron cambios en las pendientes. Sin embargo, en el periodo 1984-2011, las tendencias de las precipitaciones se dividen en sentido este-oeste; al oeste de la longitud 53° W, las tendencias son negativas y al este son positivas. Los resultados son compatibles con lo publicado en Caffera y Berbery (2006). Existen antecedentes de cambios estacionales de la circulación en el hemisferio y en la región que explicarían los resultados descritos (Minetti &Vargas, 1998).

ISSN 0187-8336 •

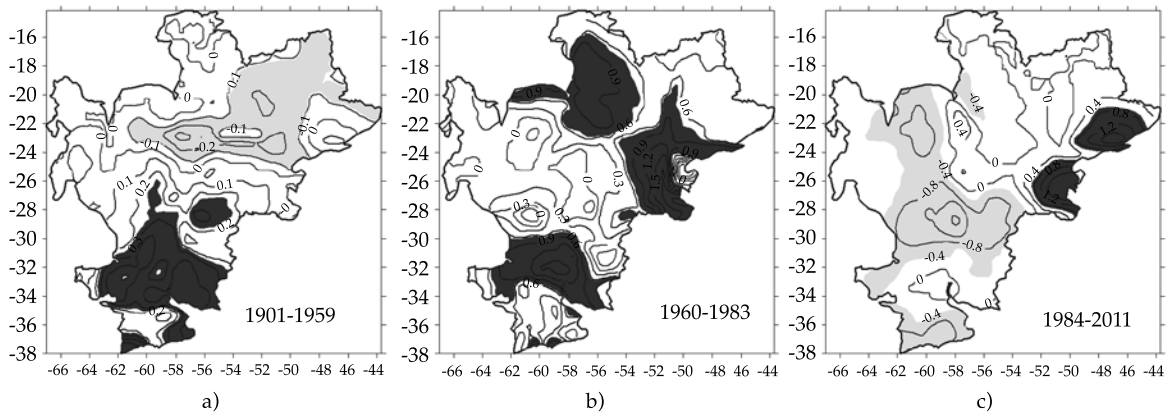

Figura 4. Tendencias lineales (10-3 /mes) de las precipitaciones estandarizadas en los tres periodos. Las áreas con valores positivos (gris oscuro) o negativos (gris claro) son estadísticamente significativos al 95%.

Comportamiento espacio-temporal de los déficit/excesos

Hasta el momento se ha caracterizado la distribución espacial de las tendencias lineales de las precipitaciones. A continuación se analizará la distribución espacial de acuerdo con las serie temporales SPI para un periodo de 12 meses, SPI [12]. Así, se transformaron las precipitaciones en cada nodo de grilla sobre LPB en series de SPI [12] y se las analizó mediante el método PCA. Las primeras diez componentes (PC1… PC10), representando más de 75% de la variabilidad total, fueron retenidas y rotadas mediante el método Varimax. El cuadro 3 muestra las varianzas de las componentes originales (PC) y las rotadas (RPC). Se observa que la distribución de las varianzas es más homogénea luego de la rotación, por lo que se adoptaron las RPC para establecer un patrón espacial.

La figura 5 muestra las regiones para SPI [12], donde cada región ha sido determinada a partir de la correlación entre cada RPC y las series de SPI [12] en cada nodo. Las regiones se determinan con las correlaciones que en valor absoluto superan 0.8. De este modo se caracte-

Cuadro 3. Señales resultantes de método SSA para las regiones RPC1 y RPC2, expresadas en periodo, varianza explicada por la señal y total explicado por todas las señales juntas.

Región	Periodo de la señal (años)	Varianza explicada	Varianza total
RPC2	4.6	23.9	48.6
	Tendencia	6.6	
	19.6	10.2	
	3.5	7.9	
RPC1	Tendencia	14.1	52.8
	7	16.8	
	4.6	11.8	
	3.5	10.1	

• ISSN 0187-8336

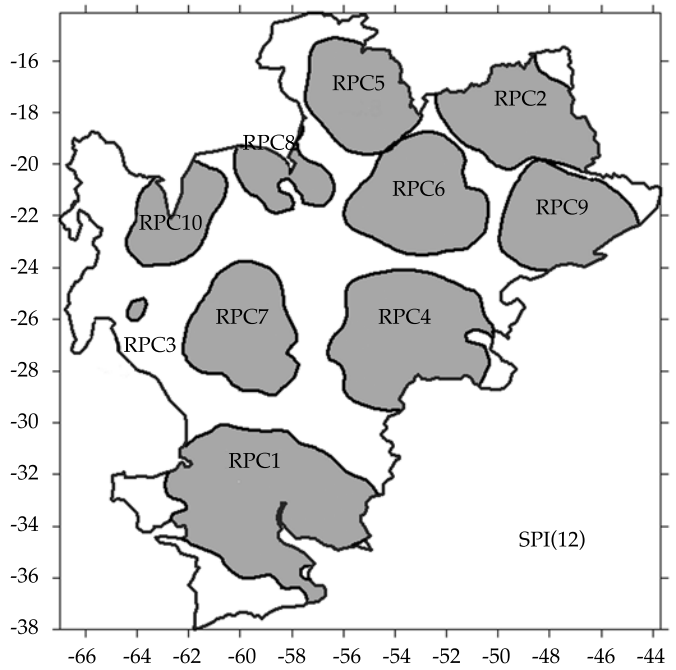

Figura 5. Zonifican de los SPI [12] según su correlación con las RPC correspondientes.

riza cada región con la componente rotada que mejor se correlaciona. Todos aquellos puntos de grillas representados por la misma componente se agrupan (ver figura 5), para poder estudiar la distribución espacial de los eventos extremos por región.

En el cuadro 4 se presenta la cantidad de eventos extremos en las regiones del SPI [12] más importantes en tamaño. Se descartaron las regiones RPC3, RPC8 y RPC10 simplemente porque representan un área pequeña de LPB. Se observa que el total de eventos extremos ha disminuido a lo largo del siglo. Durante el periodo 1901-1959, los excesos eran superiores a los déficits, mientras que en 1984-2011 se equilibra la cantidad de eventos extremos. Se destaca la región del RPC5, pues no muestra déficit extremos durante el principio y final del periodo en estudio. En general, las diferentes regiones presentan diferentes patrones de eventos extremos, probablemente debido a la mayor o menor influencia del ENSO (Menendez, 2006).

En un estudio previo, los autores encontraron, analizando la serie de SPI promedio de toda LPB, que la duración de los eventos extremos es mayor, aunque la cantidad de eventos disminuya. A pesar de que la cantidad de eventos extremos sea menor, su duración e intensidad aumentó en las últimas décadas, causando daños tanto o más cuantiosos que los anteriores (Krepper & Venturini, 2010).

Después se promediaron los series de SPI [12] de las regiones RPC1 y RPC2, a fin de representar cada región con una única serie de SPI, a la que se ha aplicado el método SSA para identificar las señales que la componen. Estas dos regiones se localizan en el extremo norte (RPC2) y el extremo sur (RPC1) de la LPB. Los resultados del SSA de ambas regiones se presentan en el cuadro 3, donde se observa que la región RPC2 tiene una señal de periodo de 19 años, una tendencia y dos señales de periodo de 4.6 y 3.5 años. En el caso de la región RPC1, las señales presentes corresponden a una tendencia, una señal de siete años de periodo y dos señales de periodo de 4.6 y 3.5 años. Se puede

ISSN 0187-8336 •

Cuadro 4. Cantidad de eventos extremos en las grandes regiones del SPI [12]. Los números subrayados corresponden a excesos extremos y los otros a déficits extremos.

Región del SPI [12]	1901-1959	1960-1983	1984-2011
RPC1	5	2	2
	4	4	6
RPC2	5	3	6
	7	4	1
RPC4	7	3	1
	2	3	5
RPC5	8	3	1
	0	4	0
RPC6	2	7	4
	4	5	5
RPC7	3	3	4
	6	3	2
RPC9	2	5	3
	4	2	2
Total de excesos extremos	32	26	21
Total de déficits extremos	27	25	21

deducir que la señal del ENSO está presente en toda la cuenca, con diferente variabilidad. En la región RPC2 se encuentra presente una señal que podría asociarse con la oscilación década del Pacífico (PDO), por sus siglas en inglés), característica de las regiones próximas al Trópico de Capricornio. La señal de siete años estaría asociada con la oscilación del Atlántico norte (NOA, por sus siglas en inglés). Esta señal se ha detectado en los caudales del Nilo (Kondrashov, Feliks, & Ghil, 2005) y en otros lugares de África (Mann, 1945). En general, los resultados son comparables con los publicados por Mo y Berbery (2011), y Caffare y Berbery (2006).

Conclusiones

Los cambios en la distribución espacio-temporal de las precipitaciones han causado inundaciones y sequías severas que afectan gran parte de Sudamérica. En la cuenca LPB, estos cambios han producido pérdidas cuantiosas de toda índole. La redistribución espacio-temporal de las precipitaciones y sus consecuencias en el balance hídrico siguen preocupando a todos los sectores productivos de la sociedad, más aún en épocas de emergencia energética, como la actual.

El análisis de las tendencias de las precipitaciones estandarizadas durante el periodo 1901-2011 muestra claramente un incremento de los valores medios hasta 1984, aproximadamente. Este incremento, a su vez, señala dos periodos diferentes, con distintas tasa de aumento, manifestados en las pendientes de las tendencias lineales. Luego de la década de 1980 sigue un periodo de disminución de los valores medios plasmados en las tendencias negativas del periodo 1984-2011, que persiste hoy en día, según estudios en curso. Es de esperar que este proceso de aumento y desaceleración de las precipitaciones se manifieste en el balance hídrico de la cuenca, produciendo cambios en los caudales. En efecto, las tendencias de las precipitaciones se manifiestan en los caudales de los diferentes ríos de la LPB, cada uno con características propias debido a las particularidades fisiográficas de las subcuencas. En este sentido, es de destacar el efecto escalonado de la deforestación, que fue masiva a fines de los

• ISSN 0187-8336

años de 1950 y 1960 en todo Brasil, pero no en Paraguay y Argentina. Esto pude ser el motivo de la respuesta desigual de los ríos luego de 1980. Sin embargo, es de destacar el comportamiento de los caudales durante el periodo 1960-1983 cuando se observa en todas las latitudes un fuerte incremento en los caudales medios. Esto muestra que a pesar de los diferentes usos del suelo y de los cambios que ha sufrido el paisaje en los últimos 50 años, las precipitaciones siguen siendo un factor importante en el balance hídrico.

El análisis espacial de las precipitaciones revela que durante el periodo 1901-1960, el noreste de la cuenca presentaba tendencias lineales negativas, mientras que el sur de la cuenca mostraba incrementos positivos. En oposición, durante el periodo 1960-1983, gran parte la cuenca tenía tendencias positivas significativas y algunas áreas centrales sin tendencia. En el último periodo se ve un proceso inverso al observado durante 1901-1959, caracterizado por pendientes negativas en todo el centro-sur de la cuenca, con pequeñas áreas en el centro-este con pendientes positivas. El aumento de las precipitaciones durante 1960-1980 no se contrarrestó con un incremento en la evaporación, que está directamente ligada con la temperatura del aire. Los caudales reflejaron este balance, que pudo ser potenciado por la deforestación, que aceleró y aumentó el escurrimiento superficial. Se destaca que a partir de 1984, las temperaturas comienzan a jugar un rol importante en el balance hídrico de la LPB, generando un aumento de la evaporación que de forma eventual superaría el ascenso de las precipitaciones, causando la disminución de los caudales medios.

El análisis espacial de los SPI anuales resultó en 10 zonas o regiones caracterizadas por una RPC. Las regiones resultantes son comparables con las delineadas por otros autores, teniendo en cuenta los patrones estacionales de las precipitaciones. La regionalización de las precipitaciones, según el SPI, nos permitió analizar la evolución de los eventos extremos en cada uno de los tres periodos. En general, se concluye que los eventos extremos fueron disminuyendo en la cuenca, aunque cada región muestra diferencias en la cantidad de eventos extremos. La vulnerabilidad de la cuenca por lo general se define con la cantidad, intensidad y durabilidad de los eventos extremos, por lo que los eventos severos no fueron evaluados en este estudio, aunque también causan pérdidas cuantiosas. En tal sentido, es importante profundizar el análisis regional de los eventos extremos según su intensidad y duración, si bien se sabe que toda la LPB es más vulnerable hoy en día por el aumento de la intensidad y persistencia de los fenómenos extremos.

En general, los fenómenos climáticos que influencian estas regiones son el ENSO, PDO y NOA. El efecto del ENSO se observa en las dos regiones analizadas, mientras que el PDO sólo afectaría a las regiones del norte, más próximas a los trópicos, y el NOA estaría incidiendo en las regiones del sur de la LPB.

Se destaca que la zonificación climática no responde a la división clásica de cuencas hidrológica. Se observa que la cuenca del río Paranaíba, que da origen al río Paraná, coincide con la RPC2, y gran parte de la cuenca baja del río Paraná está bajo la RPC1. Según la escala de la subdivisión de LPB, encontramos varias situaciones, como dos regiones climáticas sobre una subcuenca o cuencas que no están bajo ninguna región climática. Por esto se considera importante estudiar el efecto de tener dos patrones de precipitación diferentes sobre una subcuenca que a su vez presenta diferencias espaciales y temporales en el uso de suelo. Es importante avanzar con el análisis de las cuencas climáticas, junto con los cambios de usos de suelo registrados, pues permitiría conocer más sobre el comportamiento de los caudales.

Referencias

Antico, A., Schlotthauer, G., & Torres, M. E. (2014). Análisis de la variabilidad hidro-climática de la cuenca del Paraná mediante un nuevo método de descomposición modal empírica. *Memorias del II Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras*, Santa Fe, Argentina.

Báez, J. (2006). *Tendencias climáticas e hidrológicas en la cuenca del Plata. El cambio climático en la cenca del Plata*. Barros, V.,

Clarke, R., & Silva-Dias, P. (eds.). Buenos Aires: Ed. CIMA.

Barros, V., & Silvestri, G. (2002). The relation between sea surface temperature at subtropical south-central Pacific and precipitation in Southeastern South America. *Journal of Climate,* 15, 251-267.

Barros, V. R., Doyle, M. E., & Camilloni, I. A. (2008). Precipitation trends in southeastern South America: Relationship with ENSO phases and with low-level circulation. *Theoretical Applied Climatology*, 93, 19-33.

Bayer, D. M., & Collischonn, W. (2013). Deforestation impacts on discharge of the Ji-Paraná River? *Brazilian Amazon. IAHS-AISH Publication*, *359*, 327-332.

Caffera, R. M., & Berbery, E. H. (2006). La Plata basin climatology. In: *Climate change in the La Plata Basin* (pp. 16-34) Barros, V., Clarke, R., & Silva-Dias, P. (eds.). Buenos Aires: Conicet.

Duchon, C. E. (1979). Lanczos filtering in one and two dimensions. *Journal of Applied Meteorology*, 18, 1016-1012.

García, N. O., & Vargas, W. M. (1998). The temporal climatic variability in the Rio de la Plata Basin displayed by the river discharges. *Climatic Change*, 38, 359-379.

Grimm, A. M., Barros, V., & Doyle, M. (2000). Climate variability in Southern South America associated with El Niño and La Niña events. *Journal of Climate*, 13, 35-58.

Golyandina, N., Nekrutkin, V., & Zhigljavsky, A. A. (2001). Analysis of time series structure: SSA and related techniques (309 pp.). In: *Monographs on Statistics and Applied Probability 90*. Boca Raton: Chapman and May/CRC Press.

Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 drought using he standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80, 429-438.

Hirsch, R. M., Slack, J. R., & Smith, R. A. (1982). Techniques of trend analysis for monthly water quality data. *Water Resources Research*, 18. 107-121.

Horel, J. D. (1981). A rotated principal component analysis of the interannual variability of the Northern hemisphere 500 mb height field. *Monthly Weather Review*, 109, 2080-2092.

Huang, C., Kim, S., Altstatt, A., Townshend, J. R. G., Davis, P., Song, K., Tucker, C. J., Rodas, O., Yanosky A., Clay R., & Musinsky, J. (2007). Rapid loss of Paraguay's Atlantic forest and the status of protected areas -A Landsat assessment. *Remote Sensing of Environment*, 106, 460-466.

Jackson, J. E. (1991). *A user's guide to principal components* (569 pp.). New York: John Wiley & Sons.

Kaiser, H. F. (1958). The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*, 23, 187-200.

Kondrashov, D., Feliks, Y., & Ghil, M. (2005). Oscillatory modes of extended Nile River records (AD 622-1922). *Geophysical Research Letters*, *32* (10), L10702.

Krepper, C. M., & Sequeira, M. E. (1998). Low-frequency variability of rainfall in Southeastern South America. *Theoretical and Applied Climatology*, 61, 19-28.

Krepper, C. M., García, N. O., & Jones, P. D. (2006). Paraguay River basin response to seasonal rainfall. *International Journal of Climatology*, 26, 1267-1278.

Krepper, C. M., García, N. O., & Jones, P. D. (2007). Low-frequency response of the upper Paraná basin. *International Journal of Climatology*, 27, 351-360.

Krepper, C. M., & Venturini, V. (2009). Assessing Interannual Water Balance of La Plata River Basin**.** *Atm**ó**sfera*, *22*(4), 387-398.

Krepper, C. M., & Venturini, V. (2010). *La Plata Basin Vulnerability: Analysis of large water excess/shortage events*. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina, del 21 al 24 de septiembre 2010.

Leite, C. C., Costa, M. H., Soare-Filho, B. S., & Hissa, L. B. V. (2012). Historical land use change and associated carbon emissions in Brazil from 1940 to 1995. *Global Biogeochemical Cycle*, 26, 13, DOI: 10.1029/2011GB004133.GB2011.

Liebmann, B., Vera, C., Carvalho, L. M. V., Camilloni, I. A., Hoerling, M. P., Allured, D., Barros, V. R., Báez, J., & Bidegain, M. (2004). An observed trend in central South America precipitation. *Journal of Climate*, 17, 4357-4367.

Lloyd-Huges, B., & Saunders, M. A. (2002). A drought climatology for Europe. *International Journal of Climatology*, 22, 1571-1592.

Mann, H. B. (1945). Non-parametric tests against trend. *Econométrica*, *13*(3), 245-259.

Marengo, J. A. (1995). Variation and change in South America streamflow. *Climate Change*, 31, 99-17.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1993). The relation of drought frequency and duration to time scales (pp. 179-184). In: *Proceeding of the Eight Conference on Applied Climatology*, Anaheim, California, Amer. Meteor. Soc. Boston, Massachusetts, January 17-22.

McKee, T. B., Doesken, N. J., & Kleist, J. (1995). Drought monitoring with multiple time scales (pp. 233-236). In: *Proceeding of the Ninth Conference on Applied Climatology*, Dallas, Texas, Amer. Meteor.Soc. Boston, Massachusetts, January 15-20.

Menendez, A. (2006). *Tendencias hidrológicas en la cuenca del Plata. Cambio Climático en la Cuenca del Plata* (pp. 67-79). Barros, V., Clarke, R., & Silva-Diaz, P. (eds.). Buenos Aires: Conicet.

Minetti, J. L., & Vargas, W. M. (1998). Trends and jump in the annual precipitation in South America, south of the 15 °S. *Atmósfera*, 11, 205-221.

Mo, K. C., & Berbery, E. H. (2011). Drought and persistent wet spells over South America based on observations and the U.S. CLIVAR drought experiments. *Journal of Climate*, 24, 1801-1820.

National Aeronautics and Space Administration (NASA) (s.f). Earth Observatory. Recovered from http://earthobservatory.nasa.gov/Features/WorldOfChange/decadaltemp.php.

Robertson, A. W., & Mechoso, C. R. (1998). Interannual and decadal cycles in river flows of Southeastern South America. *Journal of Climate*, 11, 2570-2581.

Tucci, C. E. M., & Clarke, R. T. (1998). Environmental issues in the La Plata Basin. *Water Resources Development*, 14, 157-173.

UNESCO-WWAP (2007). *The La Plata Basin case study (Final Report)* (516 pp.). United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization- World Water Assessment Program. Recovered from http://www.unesco.org/water/wwap/case_studies/la_plata/151252e_rev.pdf.

Venturini, V., & Krepper, C. M. (2013). Long term water balance of the salado-Juramento River Basin (Argentina). *Hydrological Processes*, *27* (26), 3825-3832.

Von Storch, H., & Zwiers, W. (1999). *Statistical analysis in climatic research* (484 pp.) Cambridge: Cambridge University Press.

Yue, S., Pilon, P., Phinney, B., & Cavadis, G. (2002). The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. *Hydrological Processes*, 16, 1807-1829.

Dirección institucional de los autores

Dra. Virginia Venturini
Dr. Carlos Krepper

Universidad Nacional del Litoral (UNL)
Centro de Estudios Hidro-Ambientales
Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas
Ciudad Universitaria
Ruta Nacional 168 - km 472,4
3000 Santa Fe, Argentina
vventurini@fich.unl.edu.ar
carloskrepper@gmail.com